

学校编码: 10384

学 号: 23120110154080

分类号____密级____

UDC____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

多元差分混沌通信系统数字迭代接收关键技术研究

Research on Key Techniques of Digital Iterative

Receive for M-ary Differential Chaos Shift Keying

Modulation System

吕毅博

指导教师姓名: 王 琳 教 授

专 业 名 称: 电 路 与 系 统

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

以近似噪声的混沌信号为载波的混沌调制方式因其利用了混沌信号所具有的一些固有特性,如高自相关和低互相关的特性,以及宽带特性,使得混沌通信系统在对抗多径干扰、安全通信以及与现存窄带通信系统共存性方面具有优异的表现。因此,作为超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术的一种参选调制方案,混沌调制方式能够与 UWB 技术一起在以无线体域网(Wireless Body Area Network, WBAN)为代表的众多功率受限系统中得到应用,为这些系统提供高速、可靠的通信服务。本文以提高多元差分混沌移位键控(M-ary Differential Chaos Shift Keying, M-ary DCSK)系统的通信可靠性,降低该系统收敛门限以及时延为驱动,对用于该系统的数字迭代接收机部分关键技术,包括低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)码优化译码算法、解调-译码迭代接收机设计以及基于双原模图 LDPC 码的联合信源信道译码器设计等方面,进行了研究。

(1) 目前,对于 LDPC 码,当采用 BP 算法对中短帧 LDPC 码进行译码时,一些特殊的环形结构——陷阱集的出现,将导致译码工作的失败,进而导致错误地板的出现。因此可以定义那些属于陷阱集或者与其相连的节点,为不可靠节点。为了改善 BP 译码算法的性能,本文提出了一种以可靠性为导向的 BP (Reliability-wise BP, RW-BP)译码算法。通过在译码过程中对所有节点以及它们的对数似然值(Log-Likelihood ratio, LLR)可靠度进行评估,并采用动态加权算法降低不可靠节点以及信息的负面影响,来实现算法性能的改善。仿真结果表明, RW-BP 算法较 BP 算法在不同信道,如加性高斯白噪声(Add White Gaussian Noise, AWGN)信道以及部分相应信道,上的高 SNR 区域,纠错性能都有所改善。同时根据计算复杂度分析,该算法较 BP 算法在复杂度上有所增加,这是因为后者需要额外的加法与乘法运算。

(2) 为了能够有效的降低非相干 M-ary DCSK 系统的收敛门限,进一步降低其功耗,本文将解调-译码迭代接收机(Iterative Receiver, IR)设计引入 M-ary DCSK 通信系统之中。文中首先推导了在多径信道上有信道状态信息(Channel State Information, CSI)与无 CSI 时,基于自相关检测器输出变量的两种 LLR 值计

算方法,以便为后续的 LDPC 码译码提供软信息。基于蒙特卡罗方法的外信息转移(Extrinsic Information Transfer, EXIT)算法也被用来研究 IR 系统在 AWGN、单径瑞利衰落信道以及多径衰落信道上的收敛特性,并展示了 IR 结构相较于非 IR 结构在收敛门限上的优势。同时利用可达码率分析进一步展示了 IR 结构所带来的迭代增益以及非相干 M-ary DCSK 系统的非线性特征。

(3) 对于 M-ary DCSK 系统,同样也可将基于双 LDPC 码的联合信源信道译码器(Double Protograph LDPC based Joint Source and Channel Decoder, DP-JSCD)设计引入到该系统中,以改进其性能。但对于 DP-JSCD 与包含信源译码器的迭代接收机(Iterative Receiver with Source Decoder, IR-SD)这两种接收架构而言,何种设计能够给 M-ary DCSK 系统带来更多的迭代增益,仍是一项需要讨论的问题。通过对这两者在收敛门限、纠错性能、算法复杂度与收敛时间等方面进行分析发现:在传输具有固定统计属性的信源信息时,DP-JSCD 设计较 IR-SD 设计有明显的优势,这是因为前者能够在迭代过程中更加有效的利用信源冗余信息。该项研究结果也能够为其他通信系统的多层迭代接收机设计工作,提供参考。同时为了改善 DP-JSCD 系统的性能,本文中将 RW-BP 算法进行了改进并用于 DP-JSCD 系统之中。研究结果表明,RW-BP 算法明显的提高了 DP-JSCD 系统在地板区的纠错性能以及收敛速度。

关键词: 信道编码; 迭代接收机; 联合信源信道译码器; 多元差分混沌键控; 信息传递算法;

Abstract

Due to the inherent characteristics of chaos signal, such as wideband spectra, high auto-correlation and low correlations between different signals, chaotic communication systems which use noise-like chaotic signals as the carrier, have strong anti-interference ability for multi-path fading and high communication security. Moreover, they also can co-exist with other conventional narrowband communication systems. Therefore, as a kind of candidate modulation scheme for Ultra-Wideband (UWB) technique, chaotic modulation schemes can be employed in some power constrained communication systems, e.g. Wireless Body Area Network (WBAN), for providing high data rate communication service over complicated multi-path fading channel. In this dissertation, in order to improve the reliability of M-ary Differential Chaos Shift Keying (DCSK) system, and to reduce the convergence threshold and processing delay of this system, the key technologies of digital iterative receiver based on M-ary DCSK, which includes modified Low Density Parity Check (LDPC) codes decoding algorithm, joint demodulation and decoding iterative receiver (IR) design and double protograph LDPC codes based joint source and channel decoder (DP-JSCD) design, are systemic studied. Main contributions of the dissertation include the following aspects:

It has been found that when decoding medium or short length LDPC codes, BP algorithm will be stuck in some trapping sets. Therefore, those nodes which belong to trapping sets or connect to them can be defined as unreliable nodes. In order to improve the performance of BP algorithm, a Reliability-wise BP (RW-BP) algorithm, is introduced. By means of an extra reliability index, the reliability of each node and its Log-Likelihood Ratio (LLR) is labeled and transmitted during decoding procedure. Consequently, the unreliable nodes are identified, and the negative impact of them on decoding algorithm can be reduced by dynamic reweighted method. The simulation results suggest that RW-BP algorithm outperforms BP one at high signal to noise ratio (SNR) region over different channels, e. g., additive white Gaussian noise (AWGN) channel and partial response (PR) channel. Meanwhile, compared with standard BP algorithm, the computation complexity of this proposed one is increased due to extra addition and multiplication.

In order to reduce the convergence threshold of the non-coherent M-ary DCSK system, iterative receiver (IR) structure has been introduced in M-ary DCSK system. In this dissertation, the soft metrics of non-coherent M-ary DCSK have been derived over multi-path fading channel with channel state information (CSI) and without CSI. An extrinsic information transfer (EXIT) technique based on Monte Carlo method has been used to investigate the iteration behavior of this IR structure over different channels. The simulation results suggest that IR structure overall outperforms non-IR one at the aspect of bit error rate (BER) and convergence threshold. Meanwhile, the comparison curves of achievable rate also indicate that a gain can be obtained through an iterative processing. These simulation results also reveal that there is an optimal rate of non-coherent DCSK which depends on the channel.

In order to further reduce M-ary DCSK system's convergence threshold, joint source and channel decoder based on double photograph LDPC codes (DP-JSCD) also can be employed. Meanwhile, a question is raised: which design, DP-JSCD or Iterative receiver with source decoder (IR-SD), can provide more iterative gains to M-ary DCSK system. The EXIT analysis and simulation results suggest that DP-JSCD design outperforms IR-SD one on the aspects of BER, convergence threshold and processing delay under M-ary DCSK system over multi-path fading channel, when source information with relatively constant statistic transmitted. This research also can be considered as a reference for designing multilevel iterative receiver to other systems. In this chapter, RW-BP algorithm is also modified and employed in DP-JSCD system. The simulation results suggest that this algorithm also improves the BER performance and convergence speed of this system at high SNR region.

Keywords: Channel coding; Iterative Receiver; Joint Source and Channel decoder; M-ary Differential Chaos Shift Keying (DCSK); Message Passing Algorithm;

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目 录.....	V
CONTENTS.....	VIII
缩略词表	XI
图片目录	XIII
表格目录	XV
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	2
1.2 相关技术研究现状.....	5
1.2.1 混沌调制技术.....	5
1.2.2 LDPC 码编译码算法优化设计	6
1.2.3 迭代接收机的设计.....	8
1.2.4 联合信源信道编译码算法.....	9
1.3 本文的主要工作与创新	11
1.4 论文的结构安排	12
第二章 LDPC 码相关背景介绍	15
2.1 引言	15
2.2 LDPC 码的表示方法	15
2.2.1 矩阵表示法.....	15
2.2.2 Tanner 图表示法	16
2.2.3 度分布对表示法.....	16
2.3 原模图 LDPC 码的表示与构造	17
2.4 LDPC 码的编码方式	18
2.5 基于信息传递思想的译码算法.....	18
2.6 基于信息传递思想的 LDPC 码最短环计算算法.....	21
2.7 本章小结	25

第三章 LDPC 码译码算法优化与分析	26
3.1 引言	26
3.2 基于环结构的迭代译码算法	26
3.3 以可靠度为导向的 BP (RELIABILITY-WISE BP, RW-BP) 译码算法.....	30
3.3.1 LDPC 码各节点可靠度的判定	30
3.3.2 可靠度指数更新算法.....	32
3.3.3 RW-BP 算法具体伪代码表示	36
3.3.4 复杂度分析.....	37
3.4 仿真结果与理论分析.....	38
3.4.1 理论分析工具.....	38
3.4.2 RW-BP 算法在 AWGN 信道与 PR 信道上纠错性能结果分析	46
3.5 本章小结	55
第四章 面向多元差分混沌移位键控调制系统的数字迭代接收机设计	56
4.1 引言	56
4.2 用于 M-ARY DCSK 系统的 IR 设计.....	57
4.3 M-ARY DCSK 系统 LLR 值的计算	61
4.3.1 考虑信道状态信息(CSI)时的 LLR 值的计算	62
4.3.2 不考虑信道状态信息(CSI)时的 LLR 值的计算	63
4.4 M-ARY DCSK-IR 系统性能分析	65
4.4.1 用于 M-ary DCSK-IR 系统的 EXIT 分析	66
4.4.2 M-ary DCSK-IR 系统的可达码率分析.....	74
4.4.3 M-ary DCSK-IR 系统 BER 性能分析.....	77
4.5 本章小结	79
第五章 基于 M-ARY DCSK 调制方式的联合信源信道译码器研究与改进.....	80
5.1 引言	80
5.2 基于 M-ARY DCSK 调制的 IR-JSCD 系统模型.....	81
5.2.1 发送端编码流程与系统模型.....	81
5.2.2 接收端译码算法描述.....	83
5.3 基于 M-ARY DCSK 调制的 IR-SD 系统与 DP-JSCD 系统性能分析.....	86
5.3.1 IR-SD 系统与 DP-JSCD 系统运算复杂度与迭代时间对比	86

5.3.2 IR-SD 系统与 DP-JSCD 系统收敛门限分析	88
5.3.3 IR-SD 系统与 DP-JSCD 系统 BER 仿真结果对比.....	92
5.4 用于 DP-JSCD 系统的译码优化算法.....	94
5.4.1 用于 DP-JSCD 系统的 RW-BP 算法	94
5.4.2 DP-JSCD 系统主要陷阱集的计算	97
5.4.3 仿真结果与分析.....	100
5.5 本章小结	104
第六章 总结与展望	105
6.1 总结及主要贡献	105
6.2 工作展望	106
参考文献	108
攻读学位期间取得的研究成果	118
一、 论文情况	118
二、 国家发明专利.....	119
三、 项目情况	119
致 谢.....	120

Contents

Abstract (In Chinese).....	I
Abstract (In English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background.....	2
1.2 Status of Research	5
1.2.1 Chaos Modulation Techniques	5
1.2.2 LDPC Codes	6
1.2.3 Iterative Receiver design.....	8
1.2.4 Joint Source and Channel Coding.....	9
1.3 Contents and Contribution of the Dissertation	11
1.4 The Organization of the Dissertation	12
Chapter 2 Background of LDPC Codes	15
2.1 Introduction	15
2.2 Representation of LDPC Codes	15
2.2.1 Matrix Representation.....	15
2.2.2 Tanner Representation	16
2.2.3 Degree Distribution Representation.....	16
2.3 Representation and Construction of Protograph LDPC Codes.....	17
2.4 Encoding Algorithm of LDPC Codes.....	18
2.5 The Message Passing Decoding Algorithm	18
2.6 The Message Passing Shortest Cycles Counting Algorithm	21
2.7 Summary	25
Chapter 3 The Modification design of LDPC Decoding Algorithm and Theoretical Analysis	26
3.1 Introduction	26
3.2 Iterative Decoding Algorithm Based on Cycles	26
3.3 Reliability-wise Belief Propagation Algorithm	30
3.3.1 The Reliability of the Nodes of LDPC Codes	30
3.3.2 The Updating Rules of Reliability Indices.....	32
3.3.3 The Pseudo Code of RW-BP Algorithm.....	36
3.3.4 Complexity Analysis.....	37

3.4 Simulation Results and Thoeoretical Analysis.....	38
3.4.1 Thoeoretical Analysis Results.....	38
3.4.2 RW-BP Algorithm Simulation over AWGN channel and PR Channel.....	46
3.5 Summary	55
Chapter 4 Iterative Receiver Design for M-ary DCSK Systems.....	56
4.1 Introduction	56
4.2 Iterative Receiver Design for M-ary DCSK Systems	57
4.3 Soft Metrics of Non-coherent M-ary DCSK Systems.....	61
4.3.1 Soft Metrics with Channel State Information	62
4.3.2 Soft Metrics without Channel State Information	63
4.4 The Thoeoretical Analysis of M-ary DCSK-IR	65
4.4.1 The EXIT Analysis of M-ary DCSK-IR.....	66
4.4.2 The Achievable Rate of M-ary DCSK-IR	74
4.4.3 The BER Performance of M-ary DCSK-IR.....	77
4.5 Summary	79
Chapter 5 The Joint Source and Channel Decoder Design and Modification for M-ary DCSK Systems	80
5.1 Introduction	80
5.2 The Model of IR-JSCD System.....	81
5.2.1 The Algorithm of Encoding and Transmitting.....	81
5.2.2 The Algorithm of Receiving and Decoding.....	83
5.3 The Performance Analysis of IR-SD and DP-JSCD with M-ary DCSK Modulation Scheme over Multipath Fading Channel.....	86
5.3.1 The Complexity and Convergence Speed Analysis of IR-SD and DP-JSCD	86
5.3.2 The Convergence Threshold of IR-SD and DP-JSCD.....	88
5.3.3 The BER Performance of IR-SD and DP-JSCD	92
5.4 The Modified Decoding Algorithm for DP-JSCD	94
5.4.1 The Modified RW-BP Algorithm for DP-JSCD.....	94
5.4.2 The Trapping Set Counting for DP-JSCD	97
5.4.3 Performance Analysis	100
5.5 Summary	104
Chapter 6 Summary and Suggestions.....	105
6.1 Summary	105
6.2 Suggestions	106

Reference	108
Research Achievements in the Period of Ph.D. Education	118
1. Papers	118
2. Patents.....	119
3. Projects	119
Acknowledgement.....	120

厦门大学博硕士论文摘要库

缩略词表

AWGN	Additive White Gaussian Noise	加性高斯白噪声
APP	A Posterior Probability	后验概率
BER	Bit-Error-Rate	误比特率
BF	Bit-Flipping	比特翻转
BP	Belief Propagation	信度传播
BSC	Binary Symmetric Channel	二进制对称信道
CSI	Channel State Information	信道状态信息
CSK	Chaos Shift Keying	混沌移位键控
DCSK	Differential Chaos Shift Keying	差分混沌移位键控
DE	Density Evolution/Differential Evolution	密度进化/差分进化
D-JSCC	Double LDPC Codes Based Joint Source and Channel Coding	基于双LDPC码的联合信源信道译码器
DP-JSCD	Double Protograph LDPC codes Based Joint Source and Channel Decoder	基于双原模图LDPC码的联合信源信道译码器
EPR4	Extended Class-4 Partial Response	扩展的第4类部分响应
EXIT	Extrinsic Information Transfer	外信息转移
FAID	Finite Alphabet Iterative Decoder	有限字典迭代译码器
FCC	Federal Communication Committee	美国联邦通信委员会
FER	Frame-Error-Rate	误帧率
FM-DCSK	Frequency Modulation Differential Chaos Shift Keying	调频差分混沌移位键控
GA	Gaussian Approximation	高斯近似

IoT	Internet of Things	物联网
IR	Iterative Receiver	迭代接收机
IS	Importance Sampling	重要性抽样
ISI	Inter Symbol Interference	符号间干扰
JSCC	Joint Source and Channel Coding	联合信源信道编码
JSCD	Joint Source and Channel Decoding/Decoder	联合信源信道译码/译码器
LDPC	Low-Density-Parity-Check	低密度奇偶校验
LLR	Log-Likelihood-Ratio	对数似然比
Log-BP	Log Domain Belief Propagation	对数域 BP 算法
MET-LDPC	Multi-Edge-Type LDPC	多边类型 LDPC
MET-JSCC	Multi-Edge-Type Joint Source and Channel Coding	多边类型 JSCC
ML	Maximum Likelihood	最大似然
P-EXIT	Protograph EXIT	原模图 EXIT
PR	Partial Response	部分响应
RW-BP	Reliability-wise BP	以可信度为导向的信度传递
SNR	Signal-to-Noise-Ratio	信噪比
TS	Trapping Set	陷阱集
UWB	Ultra-Wideband	超宽带
URW-BP	Uniformly Reweighted-BP	归一加权信度传递
WBAN	Wireless Body Area Network	无线体域网
WSN	Wireless Sensor Network	无线传感网

图片目录

图 1.1 数字迭代接收机系统框图	3
图 1.2 主要研究工作的逻辑关系图	13
图 2.1 (2,4) LDPC 码 Tanner 图	16
图 2.2 原模图 LDPC 码的生成过程:原模图(a); 复制 3 次的原模图(b); 导出图(c)	17
图 2.3 LDPC 码 Tanner 图与 BP 译码算法	19
图 2.4 LDPC 码环结构 Tanner 图	21
图 2.5 环长计算算法中信息的传递	22
图 3.1 $T(5,3)$ 陷阱集示意图	28
图 3.2 一些基础陷阱集的演化过程 ^[73]	29
图 3.3 RW-BP 算法中可靠度指数更新流程图	33
图 3.4 可靠度指数更新情况示意图	35
图 3.5 重要性抽样与错误区域	43
图 3.6 采用不同加权因子的 RW-BP 算法与 Log-BP 算法性能对比	46
图 3.7 原模图 LDPC 码基础矩阵 Tanner 图	47
图 3.8 Log-BP, RW-BP, URW-BP 纠错性能对比	48
图 3.9 不同加权值方案对 LDPC 码译码的影响	49
图 3.10 RW-BP 算法与 Log-BP 算法在解不同码率 LDPC 码时的性能对比	50
图 3.11 RW-BP 算法与 Log-BP 算法对不同码长 LDPC 码的译码性能对比	51
图 3.12 PR 信道中基于原模图 LDPC 码的通信系统模型	52
图 3.13 IARA2 码原模图	53
图 3.14 RW-BP 与 Log-BP 算法在 EPR-4 信道上性能对比	54
图 4.1 用于 M-ary DCSK 系统的 IR 系统框图	57
图 4.2 M-ary DCSK 系统调制器框图	58

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.